УДК 504.064(4)

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА

А.В. Замятин, П.В. Михайлов, P. Cabral*

Томский политехнический университет
E-mail: zamyatin@tpu.ru
*New University of Lisbon, Institute of Statistics and Information Management, Portugal
E-mail: pcabral@isegi.unl.pt

Предлагается подход к определению правил функционирования клеточных автоматов, отличающийся совместным использованием четырех пространственных характеристик и позволяющий увеличит адекватность моделирования. Приведен сопоставительный анализ предложенного подхода для решения задачи анализа динамики и прогнозирования ландшафтного покрова на примере природно-территориального комплекса Португалии.

Введение

В связи с постоянно растущими техническими возможностями вычислительной техники, аппаратного, алгоритмического и программного обеспечения космического и наземного сегментов современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) увеличиваются возможности решения сложных задач анализа и прогнозирования развития явлений различных природно-территориальных комплексов (ПТК). Интересным и сложным для изучения динамики и прогнозирования представляется такой компонент ПТК как земная поверхность, и, в частности, ландшафтный покров, отличающийся существенной пространственной распределенностью и динамичностью изменения своих границ [1].

Наиболее часто анализ динамики и прогнозирование изменений ландшафтного покрова выполняется с использованием детерминированных и стохастических моделей [2]. Однако на сегодняшний день существует лишь несколько удачных примеров реализации таких моделей, использование которых оправдано при практическом решении задач изучения динамики и прогнозирования изменений ланд-

шафтного покрова [3–7]. Кроме того, существует проблема выбора модели, которая наиболее подходит для исследования и позволит обеспечить адекватное прогнозирование изменений ландшафтного покрова в каждом конкретном случае.

В данной работе проводится сравнительный анализ современных средств для решения задач прогнозирования изменений ландшафтного покрова, включая идентификацию проблем, препятствующих широкому практическому использованию таких средств. Предлагается подход, отличающийся совместным использованием четырех пространственных характеристик и позволяющий увеличить адекватность моделирования. Обсуждаются результаты применения предложенного подхода и других средств для решения задачи анализа динамики и долговременного прогнозирования ландшафтного покрова ПТК Синтра-Кашкаиш (Португалия) и даются рекомендации по выбору моделей изменения ландшафтного покрова, а также путей их использования при решении практических задач.

Существующие подходы к моделированию изменений ландшафтного покрова

Математический аппарат моделей, используемых в задачах анализа динамики и прогнозирования изменений ландшафтного покрова, в дискретном пространстве состояний представляют с использованием разностных уравнений в матричной форме записи [2]:

$$\boldsymbol{n}_{t+1}=\mathbf{P}\times\boldsymbol{n}_t, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{n}_t=[n_1,n_2,\dots,n_m]^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец абсолютных вероятностей того, что система перейдет в одно из m состояний к моменту времени $(t+1)$, T – знак транспонирования, $\mathbf{P}$ – квадратная матрица порядка m, каждый элемент p_{ij} которой является вероятностью перехода элемента из состояния Q_i в состояние Q_j за временной интервал, начиная с момента времени t до $(t+1)$.

Принимая во внимание сложность анализа экосистем в целом, и ландшафтного покрова, в частности, отмечают несовершенство имеющегося математического аппарата, алгоритмического и программного обеспечения существующих моделей, не позволяющих в достаточной степени эффективно решать задачи анализа и прогнозирования изменений ландшафтного покрова. Подавляющее большинство моделей, реализованных в качестве модулей и подсистем в различных программных системах, представляют собой исследовательские версии, не подвергавшиеся тщательному анализу. Поэтому внимание исследователей в области анализа динамики ландшафтного покрова привлекают несколько наиболее законченных программных реализаций моделей: *CLUE* (*Conversion of Land Use and Its Effects*), *LUCAS* (*Land Use Change Analysis System*), *GEM* (*General Ecosystem Model*), *PLM* (*Patuxent Landscape Model*) и *UGM* (*Urban Growth* Model) [8].

Среди этих реализаций моделей следует выделить UGM, предназначенную для исследования роста урбанизированных территорий и представленную в программном модуле *CA_Markov* в многофункциональной растровой геоинформационной системе (ГИС) *Idrisi32* (Clark Labs, Clark University, США) [9]. Эта модель (будем называть ее по имени реализующего ее программного модуля – *CA_Markov*) основана на использовании клеточных автоматов (КА), позволяющих учитывать пространственные особенности ландшафтно-классовой структуры при моделировании [10].

Другая модель, представленная в ГИС *Idrisi32 Kilimanjaro* и реализованная в модуле *Geomod* (назовем эту модель по аналогии – *Geomod*), в некоторой степени представляет собой упрощенную версию модели *CA_Markov*. Модель *Geomod* позволяет проводить при моделировании замену только одного ландшафтного типа на другой и не использует в своей основе КА, а пространственные особенности ландшафтных типов учитываются через опциональное применение фильтра в скользящем окне.

Сложность моделируемых процессов, отсутствие достаточной априорной информации, использование часто слишком простых и единых на всем моделируемом изображении правил функционирования КА (или параметров фильтрации) не позволяют учитывать многие пространственные особенности исследуемого ландшафта, что в конечном итоге может вести к снижению адекватности моделирования и сложностям практического применения таких моделей как *CA_Markov* и *Geomod*.

Подход к определению правил функционирования клеточных автоматов

Одной из наиболее сложных задач при проведении моделирования с помощью КА является определение правил их функционирования. Так, в [7] правила функционирования КА предлагается определять в каждой точке исследуемой территории на основе результирующей вероятности замещения i-го на j-ый тип ландшафта:

$$p_{ij}^{\text{рез}}=f\left(p_{ij}^{\text{вер}},\, p_{ij}^{\text{пр}},\, p_{ij}^{\text{доп}}\right), \qquad (2)$$

где $p_{ij}^{\text{вер}}$ – вероятностная характеристика, определяемая на основе значений стохастической матрицы $\mathbf{P}$, $p_{ij}^{\text{доп}}$ – вероятность, рассчитываемая на основе априорной информации, а $p_{ij}^{\text{пр}}$ -вероятность, значение которой базируется на одной пространственной характеристике – критерии насыщенности [11]. Применение нескольких пространственных характеристик для определения $p_{ij}^{\text{рез}}$ в (2), позволяющих более полно учесть особенности ландшафта, как правило, затруднено вследствие различной информативности этих характеристик и существенно различающихся диапазоном их значений. В этой связи предлагается подход к вероятностному определению правил функционирования КА, основанный на использовании четырех наиболее информативных пространственных характеристи-

ках из [12], совместное применение которых при определении $p_{ij}^{пр}$ обеспечивается единым диапазоном изменения их значений – [0;1], а также за счет эквивалентных весовых коэффициентов.

В данном случае расчет пространственных особенностей ландшафта производится в скользящем по моделируемому изображению окне порядка d с количеством элементов в нем $(2d+1)\times(2d+1)$ (при d=1 размер окна 3×3). Рассмотрим более подробно расчет четырех характеристик с учетом того, что каждый компонент этих характеристик рассчитывается в выбранном скользящем окне порядка d.

Первая характеристика, показывающая частоту встречаемости k-го ландшафтного типа, рассчитывается следующим образом:

$$C_{ЧВ(k,i)} = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} n_{k,i,j}}{n_i}, \qquad (3)$$

где $n_{k,i,j}$ – число элементов k-го типа ландшафта j-го участка в рассматриваемой окрестности i-ой точки изображения, n_i – общее число ячеек в рассматриваемой окрестности, m_i – общее число всех участков в окрестности. Под участком будем понимать набор элементов одного типа ландшафта, окруженных элементами типов ландшафта, отличными от рассматриваемого. Если исследуемая окрестность будет состоять из одного типа ландшафта, то $C_{ЧВ(k,i)}$=1.

Вторая характеристика, показывающая степень фрагментации k-го типа ландшафта, рассчитывается следующим образом:

$$C_{Ф(k,i)} = \frac{m_{k,i}}{m_i}, \qquad (4)$$

где $m_{k,i}$ – число участков k-го типа ландшафта в окрестности i-ой точки. Если исследуемая окрестность будет содержать два участка для разных типов ландшафта, то $C_{Ф(k,i)}$=0,5.

Третья характеристика, показывающая среднее фрактальное измерение периметров k-го типа ландшафта, рассчитывается как:

$$C_{СФИ(k,i)} = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \frac{2\ln(0,25\times p_{k,i,j})}{\ln(n_{k,i,j})}}{m_i} - 1, \qquad (5)$$

где $p_{k,i,j}$ – периметр j-го участка k-го типа ландшафта в окрестности i-ой точки. Если все участки k-го типа ландшафта являются простейшими (например, квадрат), то $C_{СФИ(k,i)}$=0.

Четвертая характеристика, показывающая среднее расстояние между участками k-го ландшафтного типа, рассчитывается как:

$$C_{СБР(k,i)} = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} h_{k,i,j}}{m_{k,i}\times 2d}, \qquad (6)$$

где $h_{k,i,j}$ – число элементов от j-го участка k-го типа ландшафта до ближайшего соседнего элемента участка k-го типа в окрестности i-ой точки, d – порядок скользящего окна. Если участки одного класса отдалены друг от друга на максимальное расстояние, то $C_{СБР(k,i)}$=1.

Для расчета вероятностей замещения в тот или иной тип ландшафта для каждой i-ой точки изображения в соответствии с выражениями (3)–(6) предлагается использовать два вида характеристик. Первый вид рассчитывается для текущей анализируемой окрестности (локальные характеристики), второй – для всего изображения в целом (глобальные характеристики).

Локальные характеристики для каждого из типов ландшафтного покрова рассчитываются в текущей анализируемой окрестности с использованием выражений (3)–(6), и могут быть представлены в виде вектора

$$\boldsymbol{F}_{C\,лок(k)} = \begin{bmatrix} C_{ЧВ(k,i)} \\ C_{Ф(k,i)} \\ C_{ФИ(k,i)} \\ C_{СБР(k,i)} \end{bmatrix}, \qquad (7)$$

где k – тип ландшафтного покрова, i – текущая анализируемая точка изображения.

Глобальные характеристики могут быть представлены в виде вектора

$$\boldsymbol{F}_{C\,гл(k)} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{ЧВ(k)} \\ \bar{C}_{Ф(k)} \\ \bar{C}_{ФИ(k)} \\ \bar{C}_{СБР(k)} \end{bmatrix}, \qquad (8)$$

где каждый его компонент рассчитывается для k-го типа ландшафтного покрова путем перемещения скользящего окна по всему изображению и подсчета среднего значения для каждой из характеристик (3)–(6).

Сравнивая значения векторов локальных и глобальных характеристик для различных типов ландшафта можно определить, насколько значения пространственных характеристик в скользящем окне схожи со значением пространственных характеристик на исследуемой территории в целом. Это позволит выявить вероятность принадлежности центрального элемента анализируемой окрестности к k-му типу ландшафта. Учитывая это, пространственную вероятностную составляющую предлагается рассчитывать как:

$$p^{пр} = |1 - d(\mathbf{F}_{C\,лок(k)}, \mathbf{F}_{C\,гл(k)})|, \qquad (9)$$

где $d(\mathbf{F}_{C\,лок(k)}, \mathbf{F}_{C\,гл(k)})$ – Евклидово расстояние между векторами (7) и (8).

Использование в выражении (2) вероятности $p^{пр}$ из (9) позволит более точно учитывать пространственные особенности ландшафта и адекватно рассчитывать правила функционирования КА в каждой точке исследуемой территории.

Прогнозирование изменений ландшафтного покрова с использованием различных моделей

Территория исследования и используемые исходные данные. Решение задачи анализа динамики и прогнозирования выполнялось для ПТК Синтра-Кашкаиш площадью 416 км^2 (рис. 1), расположенного на прибрежной территории к северо-западу от г. Лиссабона (Португалия). Эта территория характеризуется высоким уровнем плотности населения и его существенной динамики прироста (в период с 1990 по 2000 гг. рост составил около 30 %), что существенно повлияло на изменение границ и площадей ландшафтных классов, на места и условия проживания большого количества людей.

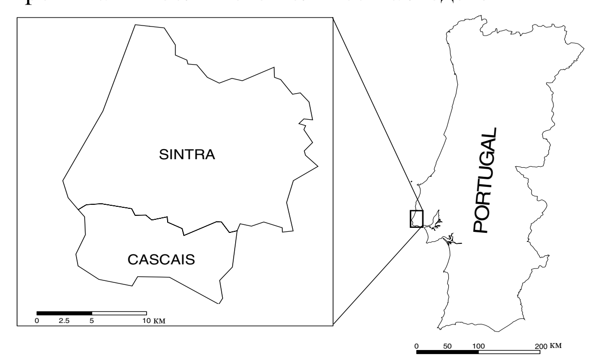


Рис. 1. *Изучаемая территория – Синтра-Кашкаиш (Португалия)*

Для решения задачи анализа динамики и прогнозирования изменений ландшафтного покрова с помощью моделирования обычно используют несколько ландшафтных карт, полученных на основе космических снимков с систем ДЗЗ или путем картирования на местности. При этом для расчета параметров моделирования используют карты поверхности для моментов времени (t–1) и t, а собственно моделирование выполняют на основе карты для момента времени t, принимая ее в качестве исходной. Кроме того, используют карту для момента времени (t+1) для оценки результатов моделирования и адекватности созданной модели.

В качестве исходных данных для моделирования изменений ландшафтного покрова использовались разновременные космические снимки системы ДЗЗ Landsat TM (получен 08.02.1994 г.) и Landsat ETM+ (получены 14.03.1989 г. и 08.04.2001 г.), что позволяет осуществить моделирование с использованием карт, полученных по космическим снимкам 1989 и 1994 гг., а оценку адекватности моделирования выполнить с использованием карты, полученной по космическому снимку 2001 г.

Для каждого из космических снимков, для таких ландшафтных классов как заселенные и незаселенные территории, по имеющимся априорным данным наземных наблюдений были построены обучающие выборки. Снимки были сегментированы с использованием алгоритма иерархической кластеризации, представленного в программном обеспечении системы eCognition 3.0. Для этого использовались все каналы (диапазоны съемки) космических снимков ДЗЗ Landsat (за исключением теплового), а также применена пороговая характеристика, матрица смежности и текстурная характеристика «однородность», что позволило с достаточно высокой точностью относить каждый из сегментов либо к классу «заселенная территория», либо – «не заселенная».

При моделировании изменений ландшафтного покрова обычно используют имеющуюся априорную информацию о влиянии тех или иных факторов на развитие (угнетение) ландшафтных типов на исследуемой территории. Формализация этой информации осуществляется с помощью функций пространственного анализа современных ГИС путем построения вероятностных карт соответствия [13]. В данной работе для построения таких карт на исследуемую территорию были использованы цифровые карты расстояний до автодорог и населенных центров, а также другая дополнительная кадастровая информация, полученная из Португальского географического института, а также цифровые карты уклонов, полученные со спутника НАСА (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Критерии оценки точности. На сегодняшний день серьезным препятствием при анализе динамики и прогнозировании изменений ландшафтного покрова является до конца нерешенная проблема оценки адекватности используемой модели и проблема оценки точности полученных результатов моделирования (прогноза). Эти проблемы связаны с тем, что для оценки точности полученных результатов моделирования необходимо иметь реальные (не модельные) данные на соответствующий момент времени. Однако даже при наличии таких данных полученная количественная оценка точности не всегда может адекватно отражать суть процессов, происходящих на земной поверхности [14]. Следует особо отметить визуальный и численный способы оценки результатов моделирования, которые в некоторых случаях могут давать различные результаты.

Для численных способов оценки точности, как при классификации аэрокосмических изображений, так и при моделировании изменений процессов ландшафтного покрова применяют самые различные критерии. Среди наиболее используемых исследователями следует отметить такие критерии как *каппа индекс согласия* (КИС), *overall accuracy*, *Kno*, *Klocation* и *Khisto* [15]. Каждый из таких критериев обеспечивает оценивание точности результатов по изображениям или тематическим картам с учетом своих особенностей. Например, *Klocation* оценивает особенности местоположения элементов ландшафтного покрова сравниваемых тематических карт, *Khisto* обеспечивает количественное сравнение элементов ландшафтного покрова этих карт. При этом КИС рассчитывается как произведение *Klocation* и *Khisto*, что позволяет учитывать и пространственные и количественные особенности

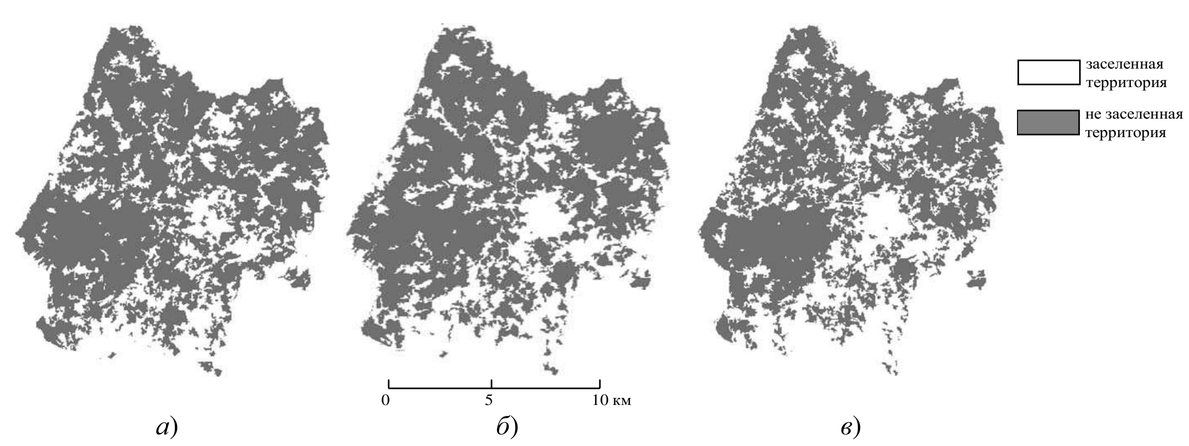


Рис. 2. *Фрагменты исходных тематических карт: а) 1989 г., б) 1994 г., в) 2001 г.*

сравниваемых фрагментов карт. В этой связи облегчить задачу оценки точности результатов моделирования и сделать ее более объективной следует с помощью совместного использования указанных выше критериев точности.

Построение вероятностной карты соответствия. Как отмечалось выше, для моделирования целесообразно использовать имеющуюся априорную информацию, которая может быть учтена с помощью вероятностных карт соответствия. Построение таких карт в этом случае следует выполнить лишь для двух типов ландшафтного покрова, для чего были использованы цифровые карты расстояний до автодорог и населенных центров, а также цифровые карты уклонов. Кроме того, на основе растровых карт на 1989 г. и 1994 г. (рис. 2, *а*, *б*) были построены дополнительные вероятностные карты соответствия допуская то, что территория, заселенная в 1989 и 1994 гг. будет заселена и в будущем.

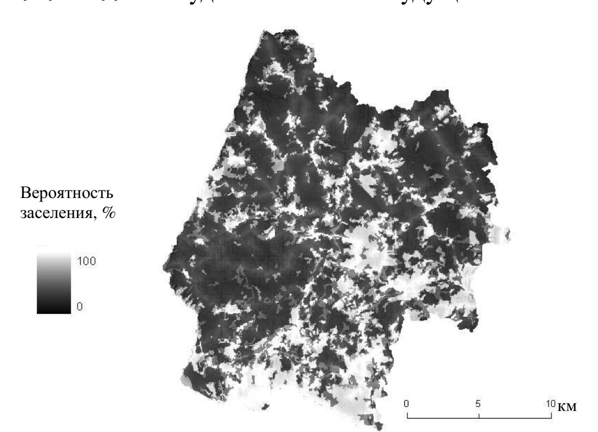


Рис. 3. *Общий вид интегрированной вероятностной карты соответствия*

В заключение из вероятностных карт соответствия путем перемножения соответствующих вероятностных значений и нормирования была сформирована интегрированная вероятностная карта соответствия, содержащая в каждой точке исследуемой территории информацию о вероятности ее заселения (рис. 3).

Используемые модели. Выше отмечалась перспективность практического применения моделей *CA_Markov* и *Geomod*, реализованных в ГИС *Idrisi Kilimanjaro*. Учитывая ряд отмеченных недостатков, присущих моделям этого типа, была предложена и реализована модель, условно названная *CA_Advanced*. Вычислительная часть этой модели реализована в среде Microsoft Visual C++ 6.0, компилятор которой обеспечивает высокую степень оптимизации двоичного кода и гибкую работу с памятью, что позволило обеспечить высокую вычислительную эффективность. Кроме того, в *CA_Advanced* реализован подход к определению правил функционирования клеточных автоматов, предложенный в данной работе и описанный выше. Все это позволило при проведении исследований, направленных на изучение динамики и на прогнозирование изменений ландшафтного покрова территории Синтра-Кашкаиш, использовать три упомянутых модели – *CA_Markov*, *Geomod* и *CA_Advanced* и оценить предложенный подход на практике.

Необходимым этапом, предваряющим практические исследования с использованием моделей, является этап их *калибрования*. На этом этапе определяются по возможности оптимальные параметры модели – размер скользящего окна, количество итераций модели, соответствующее необходимому реальному временному промежутку и т. п. В данном случае калибрование моделей с выбором наилучших параметров осуществлялось следующим образом. Параметры моделей рассчитывались по имеющимся растровым картам для 1989 г. (момент времени (t–1)) и для 1994 г. (момент времени t). Затем в качестве базового (исходного) изображения использовалась карта на момент времени (t–1), а не на момент времени t, как обычно при прогнозировании. Это позволило проводить сравнение полученных прогнозных карт на момент времени t с реальными данными на этот же момент времени и определить наилучшие параметры моделей в каждом случае.

Результаты исследований. Учитывая целесообразность оценивания точности моделей с использованием различных критериев, при проведении

исследований в данной работе совместно применены несколько статистических показателей (см. таблицу). Численная оценка величины изменений, произошедших за период с 1994 до 2001 гг. проводилась путем сравнения соответствующих тематических карт на эти годы.

***Таблица**. Результаты оценки точности прогнозных карт на 2001 г. для разных моделей, %*

Критерий точности	Модели			
	CA_Markov окно 5×5	*CA_Advanced* окно 3×3	*Geomod* окно 5×5	*«Ноль-модель»* 1994 г.
Overall accuracy	83,59	**83,95**	82,96	80,00
КИС	64,82	**66,28**	64,02	57,35
Kno	67,17	**67,90**	65,92	59,99
Klocation	75,27	68,57	68,31	64,57
Khisto	86,12	**96,66**	93,72	88,82

Результаты в таблице показывают, что более высокая адекватность моделей изменения ландшафтного покрова достигается в случаях, если происходящие (моделируемые) изменения достаточно существенны и носят тенденциозный характер. Результаты, представленные в столбце 5 таблицы показывают относительно высокие показатели для «*ноль-модели*» (зарубежные исследователи используют понятие «*Null model*») означающие, что границы и площадь типа «заселенные территории» с 1994 по 2001 гг. изменились не очень существенно, что, в свою очередь, позволяет отметить сложность оценки любых моделей с использованием имеющихся в данном случае разновременных данных. Несмотря на отмеченную сложность, практически все полученные оценки точности для модели *CA_Advanced* (выделено жирным шрифтом) несколько выше оценок для двух других моделей, что позволяет сделать вывод о целесообразности и достаточно высокой эффективности применения подхода к моделированию с помощью КА с использованием пространственных характеристик (3)–(6). Кроме этого, можно отметить перспективность проведения более масштабных дополнительных исследований, направленных на анализ информативности пространственных характеристик при определении правил функционирования КА.

Долговременный прогноз. Задачи анализа динамики ландшафтного покрова предполагают проведение как кратковременного (2–5 лет), так и долговременного (5 и более лет) прогнозов. Проведение долговременного прогноза позволяет оценить работоспособность и эффективность оцениваемых моделей, т. к. при практическом применении модели, пригодные для краткосрочного прогноза, не пригодны для долгосрочного, и наоборот. Несмотря на существенную непредсказуемость развития ландшафтного покрова в длительном периоде, долговременный прогноз с использованием работоспособной модели может быть полезен и позволит эксперту выявить и оценить существующие тенденции ландшафтного покрова и позволит ему предпринять действия, направленные на снижение вероятности возникновения кризисных ситуаций на исследуемой территории в будущем.

В данной работе на моделях *CA_Markov*, *CA_Advanced* и *Geomod* был проведен ряд экспериментов по проведению долговременного прогнозирования до 2025 г., некоторые результаты которых представлены на рис. 4. Для возможности сравнительного анализа результатов моделей использовались идентичные исходные данные. Имеющиеся растровые карты заселенных территорий и кадастровая информация позволила представить исследуемую территорию в виде 26 административно-территориальных единиц в каждой из которых была оценена значимость ожидаемых изменений.

В связи с тем, что прирост заселенных территорий (рис. 4, *а*) не носит поступательного характера, полученные результаты позволяют сделать вывод о недостаточной применимости модели *CA_Markov* для выполнения долгосрочного прогноза. В то же время использование *CA_Advanced* и *Geomod* дают в данном случае более реалистичные результаты (за исключением одной из территорий, где модель *Ge-*

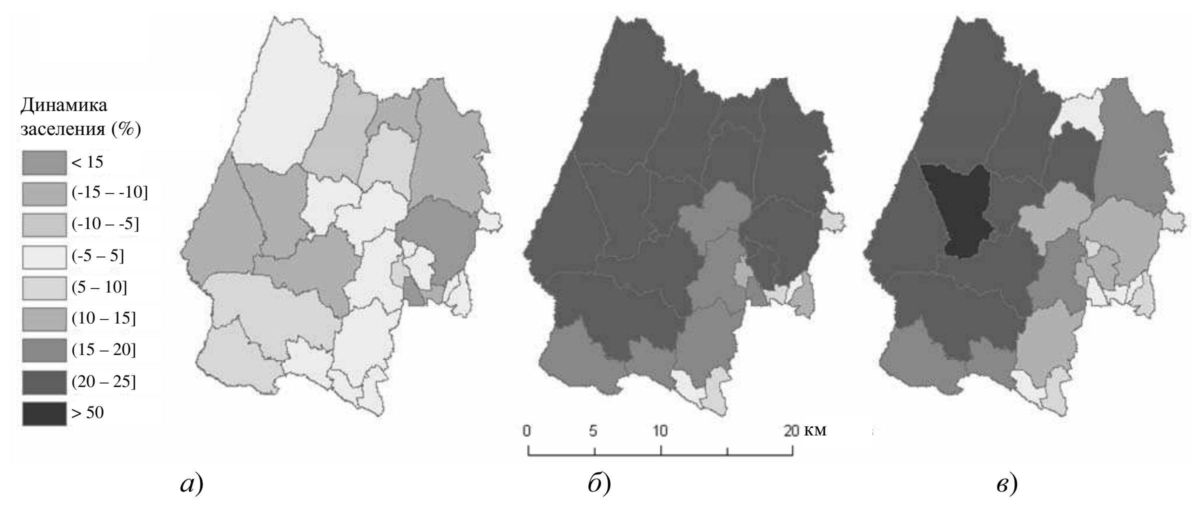


***Рис. 4.** Карты прогноза роста заселенных территорий региона Синтра-Кашкаиш (Португалия) к 2025 г., полученные с использованием моделей: а) CA_Markov, б) CA_Advanced, в) Geomod*

omod «прогнозирует» неоправданно высокий рост плотности заселения). Учитывая то, что *Geomod* обеспечивает моделирование поведения только одного ландшафтного класса, при сложной ландшафтно-классовой структуре исходных данных использование этой модели может быть не оправдано.

Заключение

Задачи анализа динамики ландшафтного покрова, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования роста заселенных территорий даже сегодня являются крайне сложными, а существующие алгоритмические и программные средства не всегда позволяют исследователям решать такие задачи с достаточной эффективностью. Данная работа была направлена на поиск более эффективных способов и средств решения задач анализа динамики и прогнозирования изменений ландшафтного покрова, в ходе которой были получены следующие основные результаты:

1. Предложен и программно реализован подход к определению правил функционирования КА, который при моделировании позволяет более точно учитывать пространственные особенности ландшафта, чем в моделях *CA_Markov* и *Geomod*, увеличивая адекватность моделирования.
2. Проведен сравнительный анализ моделей *CA_Markov*, *CA_Advanced* и *Geomod* при решении практической задачи анализа динамики, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования роста заселенных территорий региона Синтра-Кашкаиш (Португалия), который показал перспективность предложенного подхода, особенно при долгосрочном прогнозировании в условиях сложной ландшафтно-классовой структуры.
3. Сделан вывод о том, что для решения задачи долговременного прогнозирования в условиях сложной ландшафтно-классовой структуры нецелесообразно использование моделей *CA_Markov* и *Geomod*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
2. Baker W.L. A review of models of landscape change // Landscape Ecology. – 1989. – № 2. – P. 111–133.
3. Pontius Jr., Malanson J. Comparison of the structure and accuracy of two land change models // International Journal of Geographical Information Science. – 2005. – V. 19. – № 2. – P. 243–265.
4. Bell E.J. Markov analysis of Land Use Change – An Application of Stochastic Processes to Remotely Sensed Data // J. of Socioeconomic Planning Sciences. – 1974. – № 8. – P. 311–316.
5. O'Sullivan D., Torrens P.M. Cellular models of urban systems // Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata. – London: Springer-Verlag, 2000. – P. 108–117.
6. Turner M.G. Spatial simulation of landscape changes in Georgia: a comparison of 3 transition models // Landscape Ecology. – 1987. – V. 1. – № 1. – P. 29–36.
7. Замятин А.В., Марков Н.Г. Подход к моделированию изменений земной поверхности с использованием клеточных автоматов // Известия Томский политехнический университет. – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 164–169.
8. Briassoulis H. Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches. The Web Book of Regional Science, Regional Research Institute, West Virginia University. – 1999. – http://www.rri.wvu.edu /WebBook/ Briassoulis/ contents.htm (01.07.2006).
9. Clark Labs. GIS Idrisi 32. – http://www.clarklabs.org/IdrisiSoftware/ (01.07.2006).
10. Наумов Л.А., Шалыто А.А. Клеточные автоматы. Реализация и эксперименты // Мир ПК. – 2003. – № 8. – С. 64–71.
11. Verburg P.H. e.a. A method to analyse neighborhood characteristics of land use patterns // Computers, Environment and Urban Systems. – 2003. – № 3. – P. 354–369.
12. Cabral P., Geroyannis H., Gilg J., Painho M. Analysis and modeling of land-use and land-cover change in Sintra-Cascais area // 8th AGILE Conference on Geographic Information Science. – 2005. – P. 51–60.
13. Zamyatin A., Mikhaylov P. Technology of suitability maps designing for land use and land cover change modelling – http://www.agile2006.hu/papers_link.htm // 9th AGILE Conference on Geographic Information Science, 2006. (01.07.2006).
14. Jenerette G.D., Wu J. Analysis and Simulation of Land Use Change in the Central Arizona – Phoenix region // Landscape Ecology. – 2001. – V. 16. – P. 611–626.
15. Hagen A. Multi-method assessment of map similarity // 5th AGILE Conference on Geographic Information Science. – 2002. – P. 1–8.